

Planification stratégique pour la logistique urbaine verte

Olivier GUYON, Nabil ABSI, Dominique FEILLET
Ecole des Mines de Saint-Etienne
CMP – Site Georges Charpak
880, Avenue de Mimet
F-13541 Gardanne – France

Daniel BOUDOUIN
Jonction, CRET-LOG
413 avenue Gaston Berger
13625 Aix en Provence CEDEX 1 – France

Octobre 2010

Working Paper EMSE CMP–SFL 2010/6

Cet article traite de décisions stratégiques en logistique urbaine (*city logistics*). Cette problématique a en charge de définir de nouveaux schémas d'organisation, respectueux de l'environnement, dédiés aux agglomérations. Les villes, à la fois lieux de vie et de travail, ont en effet un mode de fonctionnement complexe qui nécessite une logistique spécifique. Nous définissons dans un premier temps ce qu'est exactement la logistique urbaine et présentons quelques schémas d'organisation dédiés aux agglomérations. Nous traitons ensuite de deux problématiques stratégiques centrales en logistique : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Nous référençons après cela des travaux de la recherche opérationnelle où ces problèmes ont été appliqués à la logistique urbaine. Enfin, nous nous intéressons à la prise en compte du facteur *développement durable* dans les problématiques dédiées à la logistique en général, et à la logistique urbaine en particulier.

CMP – SITE GEORGES CHARPAK

CENTRE MICROELECTRONIQUE DE PROVENCE



Planification stratégique pour la logistique urbaine *verte*

Olivier GUYON¹, Nabil ABSI¹, Daniel BOUDOUIN²
et Dominique FEILLET¹

¹ École des Mines de Saint-Étienne
CMP Georges Charpak
F-13541 Gardanne, France
{guyon, absi, feillet}@emse.fr

² Jonction - CRET-LOG
413 avenue Gaston Berger
13625 Aix en Provence CEDEX 1, France
boudouin@jonction.fr

Octobre 2010

Résumé et *abstract*

Résumé

Cet article traite de décisions stratégiques en logistique urbaine (*city logistics*). Cette problématique a en charge de définir de nouveaux schémas d'organisation, respectueux de l'environnement, dédiés aux agglomérations. Les villes, à la fois lieux de vie et de travail, ont en effet un mode de fonctionnement complexe qui nécessite une logistique spécifique. Nous définissons dans un premier temps ce qu'est exactement la logistique urbaine et présentons quelques schémas d'organisation dédiés aux agglomérations. Nous traitons ensuite de deux problématiques stratégiques centrales en logistique : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Nous référençons après cela des travaux de la recherche opérationnelle où ces problèmes ont été appliqués à la logistique urbaine. Enfin, nous nous intéressons à la prise en compte du facteur *développement durable* dans les problématiques dédiées à la logistique en général, et à la logistique urbaine en particulier.

Abstract

This paper deals with strategic decisions in *city logistics*. *City logistics* aims at finding new sustainable logistic schemes dedicated to urban areas. Large cities, both where people live and work, are indeed complex areas which need specific logistic models. First, we define what exactly *city logistics* is and introduce some logistic schemes dedicated to urban areas. Then, we deal with two main strategic problems in logistics: the network design problem and the facility location problem. In the following, research papers related to *operations research* and involving *city logistics* matters are addressed. We finally focus on the integration of the sustainability concept in problems which tackle logistics in general and *city logistics* in particular.

Catégories de l'article : **R00, R41**
selon le système de classification du *Journal of Economic Literature*

Planification stratégique pour la logistique urbaine *verte*

1 Introduction

La circulation des marchandises est une donnée importante dans l'économie locale des villes et dans la qualité de vie de ses habitants (particuliers et professionnels). Le fonctionnement d'une ville implique en effet mécaniquement des échanges de marchandises et le volume de ces derniers est reconnu comme étant un bon indicateur de la dynamique des zones urbaines.

Ces déplacements engendrent malheureusement des conditions de circulation qui se dégradent sans cesse dans des villes de plus en plus polluées et congestionnées. De nouveaux schémas logistiques, respectueux de l'environnement, doivent donc être réinventés pour mieux coller au mode de fonctionnement des agglomérations. C'est dans cette optique qu'est étudiée depuis quelques années une nouvelle problématique : la logistique urbaine (*city logistics*).

Dans cet article, nous définissons dans un premier temps ce qu'est exactement la logistique urbaine et présentons quelques moyens logistiques dédiés aux agglomérations : les *Espaces Logistiques Urbains* (Section 2). Nous traitons ensuite, dans la section 3, de deux problématiques stratégiques centrales en logistique : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Nous référençons après cela, dans la même section 3, des travaux de la recherche opérationnelle où ces problèmes ont été appliqués à la logistique urbaine. Enfin, nous nous intéressons à la prise en compte du facteur *développement durable* dans les problématiques dédiées à la logistique en général, et à la logistique urbaine en particulier (Section 4).

2 Logistique urbaine et Transport de Marchandises en Ville

2.1 Contexte et définitions

Le déplacement des marchandises (y compris les déplacements d'achat) génère une part importante des flux motorisés en ville. Les marchandises représentent environ 13 à 20% de l'ensemble des déplacements dans une agglomération comptabilisés en véhicules-kilomètres équivalent voiture particulière (DUFOR et alii, 2007). De même, on estime à 25% le taux d'occupation de la voirie urbaine par des véhicules motorisés (en circulation ou en stationnement) dévolus au transport des marchandises (DUFOR et alii, 2007).

Ces déplacements nécessaires à la dynamique des villes ne vont toutefois pas sans quelques désagréments (CRAINIC, 2008).

Au niveau fonctionnel tout d'abord, le partage de la voirie et des places de stationnement entre véhicules dédiés au transport de passagers (publics et privés) et ceux liés au transport de marchandises contribuent significativement

à la forte congestion des voies urbaines ressentie dans toutes les grandes agglomérations. À titre indicatif, on estime qu'en France, la part d'occupation de la voirie, entre 9h et 11h un jour de semaine, par les véhicules en circulation n'est que de 14% par rapport à l'ensemble des véhicules en circulation et en stationnement. D'autre part, on sait aussi que les véhicules dédiés au transport de marchandises stationnement sur des emplacements illicites dans 60% à 80% des cas (DUFOR et alii, 2007).

Au niveau économique ensuite, le transport de marchandises en milieu urbain est un maillon crucial de la chaîne logistique des acteurs de ce secteur. Les coûts induits, aussi bien au niveau des infrastructures que des coûts de desserte, par la circulation de marchandises en milieu urbain ne peuvent pas être négligés. La livraison du *dernier kilomètre* est en effet la plus coûteuse, elle représente 20% du coût total de la chaîne de distribution (INTERFACE TRANSPORT et alii, 2009).

Au niveau environnemental enfin, le transport de biens dans les agglomérations est responsable d'une part importante de la pollution atmosphérique et sonore subie par les citoyens. En effet, en France, 50% du gazole consommé en ville et 25% du CO_2 émis sont imputés au transport de marchandises (DUFOR et alii, 2007). Un rapport de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2003) estime pour sa part que 43% d'oxyde de soufre (SO_x) et 61% des particules en suspension (PM) émises à Londres sont dues au transport de marchandises. De même, ce rapport assure que la part en émissions en oxyde d'azote (NO) à imputer au transport de biens en milieu urbain est de 28% à Londres, 50% à Prague et 77% à Tokyo.

Bien que déjà préoccupants, ces chiffres ne risquent malheureusement pas de diminuer à très court terme. La quantité de marchandises transportée en milieu urbain augmente régulièrement, et est supposée encore augmenter à taux régulier (CRAINIC, 2008). Beaucoup de facteurs liés au mode de fonctionnement des entreprises mais aussi au mode de consommation des particuliers tendent en effet à favoriser une multiplication de ces transports. On peut par exemple évoquer la tendance à un fonctionnement en flux tendu des entreprises (pour éviter des stocks coûteux et de la place perdue), la modification des comportements d'achat des particuliers (le symbole le plus probant étant l'explosion du e-commerce (DURAND, 2010; FEYS, 2010)) et le recentrage de l'appareil commercial en centre-ville. Cette augmentation planifiée de trafic de marchandises en milieu urbain s'explique aussi par la densification prévue des grandes agglomérations. L'OCDE estime par exemple que la population urbaine de ses pays membres, qui représentait 50% de la population totale en 1950 et 77% en 2000, devrait atteindre 85% en 2020.

Longtemps sous-estimés par rapport au transport de passagers, les enjeux liés à la distribution urbaine et les problèmes de transport qu'elle pose dans les agglomérations sont, depuis une vingtaine d'années, mieux considérés par les collectivités. En France, la loi sur L'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (LAURE) en décembre 1996 puis la loi Solidarité et Renouvellement Urbain (SRU) en décembre 2000 ont par exemple obligé les villes à intégrer la distribution urbaine des marchandises dans leurs Plans de Déplacements Urbains. Depuis 1996, un *volet marchandises* doit en effet obligatoirement être intégré au

Plan de Déplacement Urbain (PDU) de toute agglomération urbaine française de plus de 100 000 habitants. Cette législation renforcée, mais aussi les initiatives et expérimentations menées partout dans le monde (notamment en France avec le Programme National Marchandises en Ville mis en place fin 1993 (INTERFACE TRANSPORT, 2004; GERARDIN CONSEIL, 2007), en Europe avec entre autres les actions COST et le réseau BESTUFS ou au Japon (TANIGUCHI et alii, 1999)) ont permis de mieux appréhender cette question de l'efficacité des systèmes de transport de marchandises dans les agglomérations. Cependant, le chemin vers une gestion optimale de la distribution urbaine semble être encore long (DABLANC, 2007).

Une définition formelle de l'étude de ces systèmes particuliers de transfert de marchandises en ville a été proposée dans (TANIGUCHI et alii, 2001) puis traduite de l'anglais dans (PAPAUX, 2006) ; on parle ainsi désormais de logistique urbaine (*city logistics*). La logistique urbaine est alors définie comme étant *le procédé par lequel on optimise les activités de logistique et de transport des compagnies privées avec l'aide de systèmes d'information avancés pour la gestion du trafic, de sa congestion, de la sécurité et des ressources d'énergie dans les agglomérations, à l'intérieur d'une économie de marché*. La logistique urbaine entend ainsi considérer, sous plusieurs critères d'évaluation, le flux des marchandises en milieu urbain sur l'ensemble de leur chaîne logistique, depuis le producteur jusqu'au client en passant par des zones de stockage/entreposage/dégrouperage éventuelles.

Le Transport de Marchandises en Ville (TMV), qui concerne tous les transports de marchandises au départ ou à destination des secteurs urbains, apparaît alors clairement être un maillon prépondérant de la logistique urbaine. Dans sa définition originelle (MEEDM et ADEME, 2004), le TMV se constitue de trois composantes essentielles :

- les flux relatifs aux établissements commerciaux, industriels ou tertiaires du secteur privé;
- les déplacements effectués par les particuliers pour s'approvisionner (les déplacements d'achats);
- les autres flux désignés comme flux *annexes*. Ils correspondent aux flux de marchandises occasionnés par les autres activités telles que le transport de déchets, les besoins propres des services publics, les déménagements, les livraisons à domicile, les services postaux, les hôpitaux.

2.2 Espaces Logistiques Urbains

Le besoin de desserte de marchandises en milieu urbain s'appuie nécessairement sur des plateformes, installations physiques qui sont les véritables *pilotes* du système logistique urbain. Ces équipements d'articulation des flux peuvent jouer différents rôles : stockage, entreposage, dégroupage... Ces installations ont largement quitté les agglomérations pour s'installer dans des périphéries toujours plus éloignées. Les raisons sont multiples : urbanistiques (impossibilité réglementaire de s'installer), politiques (rejet d'outils jugés créateurs de nuisances), économiques (coût du foncier prohibitif). Pourtant il est évident qu'un positionnement éloigné du barycentre urbain induit un allongement des

distances parcourues, une perte d'efficacité globale, un accroissement des Gaz à Effet de Serre et autres émissions de polluants. Aussi, nombre d'acteurs tant institutionnels que professionnels s'accordent à reconnaître l'utilité de démarches visant à repositionner les plateformes au plus près du consommateur (CBRE, 2009). Marseille est un exemple concret de ce constat, la logistique urbaine de cette grande agglomération française tend en effet aujourd'hui vers un véritable retour à la proximité (MOIROUX, 2009).

Les besoins en installations logistiques des villes portent sur des surfaces de terrain de taille conséquente. Selon le Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres en France (PREDIT), 10 à 15 hectares de zones logistiques urbaines sont nécessaires par tranche de 100 000 habitants ; 4 hectares de terrain par tranche de 100 000 habitants devant de plus être trouvés tous les 10 ans afin de renouveler les installations existantes. Cela signifie par exemple que les besoins propres de la seule ville de Marseille (24 000 hectares de superficie et 850 000 habitants en 2007) en plateformes dédiées à la logistique urbaine sont de l'ordre de 100 à 120 hectares (MOIROUX, 2009).

Dans le cadre d'une action fédérative française menée de 2001 à 2004 : *Espaces Logistiques Urbains (ELU)*, un groupe de recherche s'est intéressé à la coordination des méthodes expérimentales déjà concrètement employées dans certaines villes. Leur but était d'identifier les pratiques et leurs impacts, de repérer les actions potentiellement intéressantes, pour évaluer les effets d'une nouvelle organisation des livraisons et enlèvements en milieu urbain. Cette étude a abouti sur la caractérisation de catégories spécifiques d'équipements : les espaces logistiques urbains qui servent efficacement la logistique urbaine (BOUDOUIN, 2006).

Les espaces logistiques urbains sont des équipements destinés à optimiser la livraison des marchandises en ville, sur les plans fonctionnel et environnemental, par la mise en œuvre de points de rupture de charge. Les intérêts de telles installations sont divers. Ils peuvent par exemple contribuer à une meilleure gestion fonctionnelle de la ville (dynamiser des zones denses, fluidifier la circulation...), à des économies de gestion (limiter les coûts d'infrastructures et de transport) mais aussi à une amélioration de l'impact environnemental de la logistique urbaine (améliorer l'image du centre-ville, minimiser le nombre de véhicules, les distances qu'ils parcourent et les émissions de polluants...).

Cinq catégories d'espaces logistiques urbains sont détaillées dans l'étude : les Zones Logistiques Urbaines, les Centres de Distribution Urbaine, les Points d'Accueil des Véhicules, les Points d'Accueil des Marchandises et les Boîtes Logistiques Urbaines. Ces catégories diffèrent selon leur mission première (niveau d'intervention sur la chaîne de la logistique urbaine), les zones géographiques qu'elles couvrent, les niveaux d'intervention (financier et juridique) de la collectivité pour leur mise en place, et les moyens (matériels et humains) utiles à leur fonctionnement.

Dans notre article, nous reprenons les résumés de (BOUDOUIN, 2006) proposés dans (DUFOUR et alii, 2007) pour chacune de ces cinq catégories d'ELU.

Les Zones Logistiques Urbaines (ZLU) “Les ZLU ont pour finalité de localiser les professionnels à proximité de leurs clients afin de limiter les mouvements de véhicules. Le but est de faire revenir dans les agglomérations des

professions qui en ont été chassées ces dernières décennies. Les gares fermées, Marchés d'Intérêt National, hôtels logistiques, espaces spécialisés, sont des ZLU. Leur mise en place implique obligatoirement une intervention des pouvoirs publics. Leur mise en œuvre peut permettre d'abaisser de 25% le nombre de véhicules utilitaires en circulation et diminuer d'autant les nuisances."

En France, un certain nombre d'études quant à l'intérêt de créer une ZLU ont vu le jour dans différentes villes (Paris, Marseille, Lyon, Strasbourg, Toulouse...) (GERARDIN CONSEIL, 2007) ; certaines d'entre-elles aboutissant à des projets concrets. Marseille, par exemple, dispose d'une ZLU située en plein cœur de son centre-ville sur le site ferroviaire d'Arenc. Cette plateforme de 9 hectares est principalement dédiée aux activités de logistique urbaine.

Les Centres de Distribution Urbaine (CDU) "Les CDU¹ permettent de [mutualiser] les flux qui pénètrent ou sortent de la ville en les canalisant vers un site où sont groupées ou dégroupées les marchandises avant la distribution finale par un opérateur unique. Un opérateur nouveau [public ou privé] intervient donc dans la chaîne logistique, ce qui nécessite une nouvelle organisation impliquant une rupture de charge. La part d'envois pouvant être captée par un CDU se situe aux alentours de 15% du total. Ce concept est particulièrement adapté à la messagerie (le plus problématique pour le fonctionnement de la ville)."

Les CDU sont apparus pour beaucoup de collectivités comme étant un élément prépondérant à une meilleure gestion de la logistique urbaine. Il n'est ainsi pas surprenant d'observer que des CDU soient impliqués dans beaucoup d'études et projets à travers le monde (INTERFACE TRANSPORT, 2004; BROWNE et alii, 2005; GERARDIN CONSEIL, 2007; GONZALEZ-FELIU et MORANA, 2010).

Les Points d'Accueil des Véhicules (PAV) "Les PAV sont destinés à la livraison d'envois de petite taille, ils offrent aux véhicules utilitaires la possibilité de stationner en un lieu gardienné, garanti libre d'accès et sécurisé, d'où [le(s) chauffeur(s)-livreur(s) rejoindra(ont)] à pied (éventuellement avec l'aide de moyens de manutention) le lieu de destination. Un tel espace doit permettre le stationnement en simultané de 5 à 10 véhicules. Il peut traiter de 200 à 300 colis par jour. Il s'adresse aux envois de type express. Son coût est lié pour l'essentiel à la rémunération d'un ou deux agents. Un tel service réduit l'encombrement de la voirie et permet un gain pour les transporteurs se mesurant en temps gagné et en kilomètres parcourus."

La présence de personnel dédié au PAV garantit que le site soit un lieu libre de tout usage et sécurise les véhicules et les marchandises transportées. Une fonction d'aide à la manutention peut aussi être envisagée pour ces personnels.

En France, la première implantation d'un PAV a été initiée dans le centre-ville de Bordeaux en 2003, en parallèle à la mise en place de la première ligne de tramway de l'agglomération (SCHILDE, 2007).

Les Points d'Accueil des Marchandises (PAM) "Les PAM permettent de concentrer les envois à destination ou en provenance d'une zone difficile d'accès. Ces interfaces se substituent au destinataire ou à l'expéditeur pour éviter le *dernier mètre*. Ce principe présente l'avantage de minimiser le nombre de véhicules-kilomètres nécessaires pour présenter plusieurs fois la marchandise

¹en anglais : City Distribution Center ou Urban Freight Consolidation Center

en l’absence répétée du destinataire et de mieux gérer les tournées par une plus grande souplesse horaire et spatiale. Le rayon d’application est de 100 à 150m pour les commerçants et artisans et beaucoup plus pour les particuliers, dispensés d’une *permanence* pour attente de livraison. Ces équipements sont de taille modeste (de 10 à 60 m^2) et les volumes traités généralement inférieurs à 200 colis/jour. Ils peuvent être développés par des structures publiques ou privées et être dédiés à cette activité ou positionnés dans un établissement (commercial ou de service). Les avantages se retrouvent au niveau des temps de tournée et permettent des gains substantiels pour les transporteurs qui n’ont plus à se rendre chez le client.”

Un exemple important de réseaux de PAM est le réseau Kiala. Lancé en 2001 en Belgique et au Grand Duché de Luxembourg, Kiala s’est depuis déployé dans de nombreux pays d’Europe (France, Pays-Bas, Espagne). En 2010, l’entreprise compte 5 400 relais traitant ensemble jusqu’à 136 000 colis par jour. En France, le réseau compte 3 900 relais en 2010 et poursuit sa densification avec l’objectif annoncé d’atteindre 7 000 relais en 2011 ([KIALA, 2010](#)).

Les Boîtes Logistiques Urbaines (BLU) “Les BLU sont des interfaces qui permettent de relier le transporteur et le client sans que la présence d’une personne sur le lieu de transfert ne soit nécessaire, tels des sas, des casiers aménagés ou apportés, des automates. . . Ils peuvent être implantés sur des espaces privés ou publics. La procédure classique (réception du colis/reconnaissance de la livraison) est ici changée, ce qui implique une déconnexion des opérations de transport et d’administration de l’envoi. En dehors des sas, le rôle des BLU reste axé sur des envois inférieurs à 1 m^3 . Les structures publiques sont a priori peu impliquées dans le développement de ces outils, mais leur intérêt économique et environnemental justifie un encouragement de leur installation. Le principal intérêt réside dans la capacité à livrer en dehors des heures de pointe, ce qui permet de multiplier le nombre de points livrés durant un même laps de temps.”

La France dispose à l’heure actuelle d’un faible nombre de BLU. En 2010, les acteurs principaux sur ce marché français encore en phase de lancement sont La Poste (avec ses relais Cityssimo) et Consignity.

2.3 La logistique urbaine : une problématique d’une grande variété

Par définition, la logistique urbaine est une problématique très variée, tant par les différents objectifs qu’elle cherche à optimiser (économique, environnemental, sociétal) que par les acteurs variés et les nombreux niveaux de décision qu’elle tend à considérer. Selon ([McKINNON, 1999](#); [DELAÎTRE, 2008](#)), les décisions prises par les entreprises pour gérer au mieux le transport de marchandises en ville se déclinent en quatre grands types de fonctions :

- fonctions *stratégiques* : elles concernent les décisions affectant le nombre de sites, les capacités des sites, des entrepôts et quais de chargement;
- fonctions *commerciales* : elles affectent les décisions commerciales d’approvisionnement, de conceptualisation et de distribution. Ces décisions établissent un réseau qui lie les différentes entreprises et permet le transit de marchandises entre les partenaires;

- fonctions de *planification* : elles s'intéressent aux décisions concernant le programme de production et de distribution;
- fonctions de *transport* : elles relèvent des décisions liées aux moyens d'acheminement des marchandises comme l'utilisation d'une flotte de véhicules attitrée ou d'un opérateur de transport externe, le choix d'un itinéraire...

La logistique urbaine est aussi complexe car elle est constituée d'un très grand nombre de chaînes logistiques de taille et de fonctionnement qui varient en fonction des acteurs et des produits en transit.

Devant une problématique à tels enjeux et d'une aussi grande diversité, il apparaît alors clair que la recherche opérationnelle, qui *propose des modèles conceptuels pour analyser des situations complexes et permet aux décideurs de faire les choix les plus efficaces* (BILLAUT, 2006), peut s'avérer d'une très grande utilité.

Dans la section suivante, nous nous focalisons sur les problématiques qui engagent les acteurs de la logistique, et par extension de la logistique urbaine, sur du long terme. Dans le découpage classique en trois niveaux de décision de l'entreprise (stratégique, tactique et opérationnel) (VOLLMANN et alii, 1997), ce choix revient à situer notre étude sur les problématiques organisationnelles impactant le plus haut niveau de décision : le niveau stratégique.

3 Planification stratégique en logistique

Deux problématiques centrales se dégagent lorsqu'on évoque la planification stratégique dans le domaine de la logistique : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Ces deux problématiques complémentaires couvrent en effet le panel des principales décisions stratégiques qu'une entreprise spécialisée peut prendre quant à son organisation logistique. Ainsi, le *network design problem* s'intéresse d'un côté à définir la meilleure conception des réseaux de distribution alors que le *facility location problem* vise lui à optimiser la localisation des différentes infrastructures de l'entreprise. Du fait de leurs nombreuses applications pratiques, ces deux problématiques (et leurs variantes) ont fait l'objet de nombreux travaux en recherche opérationnelle.

Nous proposons ici de définir, dans un premier temps, la version originelle, et les principales variantes, de ces deux problèmes. Nous centrons ensuite notre discours sur les travaux traitant de leur application à la logistique urbaine.

3.1 Problème de conception de réseau (*Network design problem*)

Conçu dans les années 1960 pour gérer des problématiques de conception de réseaux de télécommunication, le panel d'application des modèles de *network design problem* s'est depuis très nettement étoffé. Il est désormais commun

d'utiliser de tels modèles dans la micro-informatique, les réseaux de transport (personne, énergie, eau...), la logistique, les systèmes de production-distribution...

Le *network design problem* vise à concevoir un réseau optimal sur lequel des entités, appelons-les produits, seront transportées entre différents points.

Dans le modèle générique : le *fixed cost network design problem* (MAGNANTI et WONG, 1984; MINOUX, 1989; CRAINIC, 2000), on considère un graphe $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$, avec \mathcal{N} un ensemble de nœuds et \mathcal{A} un ensemble d'arcs. On s'intéresse de plus à un ensemble de produits $p \in \mathcal{P}$ à transporter sur le réseau ; une quantité q^p de chaque produit transitant depuis un nœud origine $o^p \in \mathcal{N}$ vers un nœud destination $d^p \in \mathcal{N}$. Le problème consiste alors à déterminer le sous-ensemble d'arcs de \mathcal{A} qui assure le transit de l'ensemble des produits de \mathcal{P} au moindre coût. Le coût d'une solution se caractérise par la somme des coûts *fixes* de sélection des arcs (chaque arc de \mathcal{A} a un coût de sélection) et des coûts de transport, dits *variables* (chaque arc de \mathcal{A} a un coût de transport selon le produit $p \in \mathcal{P}$ en transit).

La figure 1 illustre une instance d'un *fixed cost network design problem*. Dans cet exemple, on s'intéresse à un unique produit p_1 et à un graphe \mathcal{G} composé de 4 nœuds et 5 arcs. 7 unités de p_1 doivent transiter depuis le nœud 1 vers le nœud 4. La solution optimale de cette instance consiste à faire circuler les 7 unités de p_1 sur les arcs (1,2), (2,3) et (3,4). On obtient ainsi une solution de coût 133 correspondant à la somme des coûts fixes de sélection des arcs ($20 + 5 + 10$) ajoutée à la somme des coûts de transport ($7 \cdot (2 + 2 + 10)$).

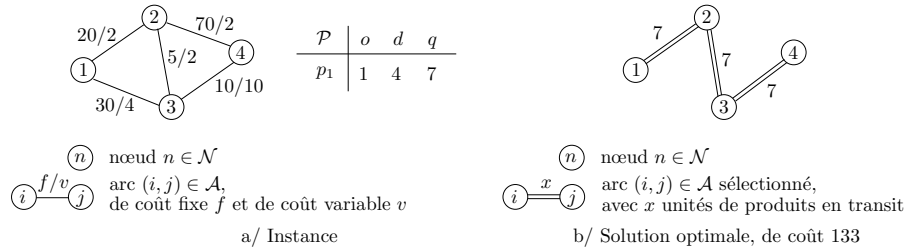


Figure 1: Exemple d'un *fixed cost network design problem*

L'annexe A.1 propose une formalisation sous forme d'un programme linéaire mixte du *fixed cost network design problem*.

Une multitude de variantes à ce modèle de base existent. Toutes exploitent ce modèle générique et y rattachent des contraintes additionnelles (plusieurs produits en transit, des capacités sur les arcs, des contraintes budgétaires, une distance maximale de transit d'un produit à respecter...) et/ou des fonctions-objectif différentes (non linéaire...). Nous renvoyons le lecteur à (MAGNANTI et WONG, 1984; MINOUX, 1989; BALAKRISHNAN et alii, 1997; THOMADSEN et STIDSEN, 2007) pour un état de l'art complet et les principales références à ces variantes.

D'un point de vue théorique, beaucoup de *network design problems* sont NP-difficiles (CRAINIC, 2000).

Un grand nombre de problématiques classiques de la recherche opérationnelle peuvent être formalisées sous la forme d'un *network design problem* (WONG, 1978; MAGNANTI et WONG, 1984). Parmi eux figurent par exemple le problème de plus court chemin, le problème de l'arbre de Steiner, le problème du voyageur de commerce. . .

Le *facility location problem* s'ajoute lui aussi à cette liste de problèmes formalisables sous la forme d'un *network design problem*. Dans la section suivante, nous nous intéressons de plus près à ce problème.

3.2 Problème de localisation de sites (*Facility location problem*)

Le *facility location problem* (MIRCHANDANI et FRANCIS, 1990; DASKIN, 1995; DREZNER et HAMACHER, 2004; KLOSE et DREXL, 2005; REVELLE et EISELT, 2005; REVELLE et alii, 2008) fait référence à une classe de problèmes de localisation de sites dans un espace géographique prédéfini.

Sommairement, chaque variante du *facility location problem* considère en entrées deux ensembles \mathcal{J} et \mathcal{I} . \mathcal{J} est un ensemble de nœuds représentant chacun une localisation possible pour l'implantation d'un dépôt ; un dépôt pouvant être une usine de fabrication ou une plateforme de distribution. \mathcal{I} est un ensemble de nœuds symbolisant chacun un client ; un client $i \in \mathcal{I}$ étant caractérisé par un niveau de demande q_i . Selon les cas pratiques considérés, \mathcal{I} et \mathcal{J} peuvent être disjoints ou non-disjoints (voire égaux). Un des objectifs du problème consiste à déterminer un sous-ensemble de nœuds sur lesquels créer des dépôts. Chaque client est alors rattaché à un ou plusieurs dépôts qui le desservent.

Dans la version de base du problème, le *p-median problem* (HAKIMI, 1964, 1965), on s'intéresse à localiser exactement p dépôts puis à rattacher chaque client à l'un d'eux. L'objectif du problème consiste à minimiser la somme totale des distances, pondérées par les demandes, des clients à leur dépôt. Le *p-median problem* a été prouvé NP-difficile par Kariv et Hakimi (KARIV et HAKIMI, 1979).

La figure 2 décrit une instance de *p-median problem* impliquant 5 clients et 3 localisations possibles. Dans cet exemple, 2 dépôts doivent être localisés. La figure 2.b illustre une solution de cette instance. Deux localisations sont sélectionnées et chaque client est rattaché à l'une d'elles. Les clients ayant une demande respective égale à 100 et à 20 sont ainsi liés au même dépôt, alors que les clients dont la demande vaut respectivement 50, 15 et 10 sont connectés à l'autre localisation retenue.

L'annexe A.2 décrit la formalisation sous forme de programme linéaire en nombres entiers du *p-median problem* proposée dans (REVELLE et SWAIN, 1970).

Le *Uncapacitated Facility Location Problem* (UFLP) , aussi appelé *Simple Plant Location Problem*, est une variante du *p-median problem*. Dans le UFLP,

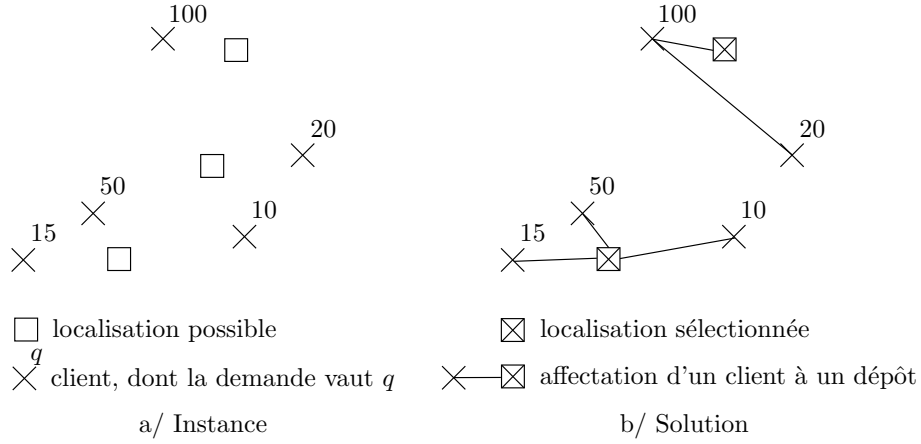


Figure 2: Exemple d'un p -median problem ($p = 2$)

le nombre de dépôts à ouvrir n'est plus une constante : il doit être décidé. Un coût fixe d'ouverture d'un dépôt en chaque nœud est alors donné en entrée du problème. La fonction objectif devient une somme décomposable en deux termes : la somme des coûts fixes d'ouverture des dépôts d'une part, et la somme totale des distances, pondérées par les demandes, des clients à leur dépôt d'autre part.

Le *Capacitated Facility Location Problem* (CFLP) est très similaire au UFLP. Seules des contraintes sur les capacités des dépôts sont ajoutées : chaque dépôt ne peut traiter qu'un volume limité de demande. Ces contraintes additionnelles annulent alors l'optimalité de la mono-affectation des clients à un dépôt ; propriété à la fois valable pour le p -median problem et le UFLP. En effet, pour chacune de ces deux variantes du *facility location problem*, il est trivial de vérifier qu'il est optimal de rattacher les clients à un unique dépôt : le dépôt ouvert le plus proche (au sens des distances).

Les trois principales variantes du *facility location problem* proposées ci-dessus considèrent généralement des chaînes de distribution à un seul niveau, c'est-à-dire, les dépôts sont identiques et directement reliés au client. On parle alors de *single-stage facility location problem*. Lorsque la chaîne de distribution à considérer est plus complexe et nécessite le recours, par exemple, à des usines de fabrication qui desservent des dépôts de stockage d'où les clients sont approvisionnés, on s'intéresse à des problématiques avec des dépôts à différencier selon leur niveau dans la chaîne logistique. On parle alors de *multi-stage facility location problem*.

D'autres variantes du *facility location problem* existent. Leur formalisation est cependant toujours fortement liée aux modèles proposés ci-dessus.

3.3 Couplage *network design problem* et *facility location problem*

Le *network design problem* et le *facility location problem* sont deux problèmes très complémentaires dans la constitution de la chaîne logistique d'une entreprise. Le premier s'attache en effet à définir un réseau de distribution (éventuellement intermodal) robuste et rentable alors que le second vise à gérer de manière efficace les infrastructures de production et/ou stockage. Bon nombre de travaux attestent de l'intérêt des chercheurs pour la complémentarité évidente de ces deux problématiques.

(MELO et alii, 2009) présente un état de l'art très récent des problématiques intégrant *facility location problem* et *supply chain management* (problématique connexe au *network design problem*) ; les quelques 120 articles référencés étant parus entre 1995 et 2008. Dans cette étude, les problématiques sont catégorisées selon les données qu'elles considèrent (un ou plusieurs niveaux dans la chaîne logistique, un ou plusieurs types de produits, une ou plusieurs périodes de planification, des données déterministes ou stochastiques) et le type de décisions qu'elles tendent à prendre (capacité des dépôts, niveaux de stock, gestion de la production, gestion des modes de transport...). La liste des publications incombant à chaque catégorie est ensuite proposée au lecteur. Dans leur conclusion, les auteurs expriment, entre autre, le regret de ne pas voir plus d'articles scientifiques s'attaquant à des problèmes concrets. Ils pensent en effet que les problématiques étudiées portent trop souvent sur des organisations logistiques simplistes : un seul produit et un seul type de dépôts sont généralement pris en compte.

3.4 Travaux en logistique urbaine

Même si le nombre de travaux dans ce domaine reste encore faible, la planification stratégique de la logistique urbaine commence à être de plus en plus considérée par les scientifiques. Cet essor s'explique par les forts enjeux d'une meilleure gestion de la logistique urbaine qui se font de plus en plus ressentir, à la fois au niveau social et au niveau politique. De nombreux projets scientifiques dédiés, financés par les collectivités, voient donc le jour (COST, BESTUFS...) depuis quelques années maintenant.

(CRAINIC et alii, 2009b) propose un état de l'art complet des travaux de recherche opérationnelle appliqués à la logistique urbaine. On peut s'apercevoir que la plupart de ces travaux étudient la rentabilité de la consolidation des marchandises à travers des Centres de Distribution Urbaine (définis dans la section 2.2) (TANIGUCHI et alii, 1999; TANIGUCHI et VAN DER HEIJDEN, 2000; TANIGUCHI et THOMPSON, 2002; CRAINIC et alii, 2004; TANIGUCHI et THOMPSON, 2006; CRAINIC, 2008; CRAINIC et alii, 2009b). Différents schémas de la chaîne logistique sont étudiés dans ces articles : *single-stage* ou *multi-stage* (par exemple, des plateformes de stockage de grande taille en dehors de la ville et des Centres de Distribution Urbaine de taille modérée à l'intérieur de la ville).

De nombreux travaux en logistique urbaine font également état de l'usage de nouvelles technologies dans le monde du transport (les *Intelligent Transport*

Systems) (TANIGUCHI et alii, 2001; CRAINIC et alii, 2004, 2009a). Tous ces outils (GPRS, GPS, RFID...) de plus en plus perfectionnés permettent idéalement aux logisticiens d'obtenir une information fiable en temps réel. Dans un contexte urbain dense et congestionné, une telle qualité d'information est décisive. Cela fait ainsi de la logistique urbaine une logistique à part avec des organisations nouvelles à inventer.

Une problématique ressort tout particulièrement des travaux de la recherche opérationnelle appliquée à la logistique urbaine. Il s'agit du problème de tournées de véhicules à deux niveaux (*two-echelon vehicle routing problem*) (PERBOLI et alii, 2008; CRAINIC et alii, 2010). Dans ce problème, des systèmes de logistique urbaine à deux niveaux sont étudiés. Au premier niveau, des marchandises sont transportées par des véhicules de taille importante depuis un unique dépôt principal (généralement un Centre de Distribution Urbaine situé aux abords de l'agglomération considérée) vers un nombre fixé de dépôts de petite taille (des points de ravitaillement situés au cœur de la ville) où elles sont transférées à des véhicules urbains légers. Au second niveau, les véhicules légers effectuent des tournées pour déplacer les marchandises des points de ravitaillement vers les clients auxquels elles sont destinées.

4 Planification pour la logistique urbaine verte

4.1 Logistique verte

La norme X 50-600 de l'Association Française de NORmalisation (AFNOR) définit la *logistique* comme étant *une fonction dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés ou latents, aux meilleures conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé. Les besoins sont de nature interne (approvisionnement de biens et de services pour assurer le fonctionnement de l'entreprise) ou externe (satisfaction des clients). La logistique fait appel à plusieurs métiers et savoir-faire qui concourent à la gestion et à la maîtrise des flux physiques et d'informations ainsi que des moyens.*

Dans un contexte économique capitaliste, l'objectif principal de la *logistique* revient alors à coordonner les activités de l'entreprise, tout au long de sa chaîne logistique (allant depuis les fournisseurs vers les clients), de manière à satisfaire la demande de ses clients au moindre coût. Jusqu'alors, la notion de coût était généralement traduite en termes financiers. La mentalité collective évoluant, cette considération purement monétaire tend aujourd'hui à changer : les coûts environnementaux de la logistique (impact sur le changement climatique, pollution atmosphérique et visuelle, bruit, accidentologie, production d'énergie, congestion...) sont devenus des facteurs décisionnels importants. On parle ainsi désormais de logistique verte (*green logistics*).

En accord avec cette évolution des mœurs, la recherche opérationnelle tente de définir de nouveaux modèles qui optimisent les processus impactant toute chaîne logistique au travers des trois volets (économie, environnement et société) de cette nouvelle conception de l'intérêt public qu'est le *développement durable* (SBIHI et EGLESE, 2007).

Un frein notable à la mise en place de tels modèles porte sur l'évaluation des solutions logistiques. En effet, autant il est relativement aisé de quantifier des coûts financiers, autant il est complexe de lister et quantifier des coûts environnementaux et sociétaux. Des avancées aussi bien politiques (par exemple, dans le domaine du transport : Eurovignette 1 et 2 en France ou (MAIBACH et alii, 2008) en Europe) que scientifiques (par exemple, dans le domaine du transport : (OMRANI et alii, 2009; SATHAYE et alii, 2010)) proposent des éléments méthodologiques pour quantifier ces coûts dits *externes*. (OMRANI et alii, 2009) propose par exemple une approche basée sur la méthode *Analytic Hierarchy Process* pour l'évaluation multicritère de projets de transport comme les parcs relais, le covoiturage. . . Dans cet article, les auteurs considèrent le covoiturage comme cas d'étude pour valider leur méthodologie. Ils utilisent alors les critères de pollution atmosphérique (critère lui-même divisé en trois sous-critères : émission de CO_2 , NO_x et CO) et de bruit pour estimer l'impact environnemental du covoiturage.

Il semble néanmoins que de nombreux efforts doivent encore être effectués avant qu'un consensus quant à une méthodologie complète d'estimation du facteur *développement durable* ne soit atteint. Dans un rapport d'évaluation des projets en matière de distribution urbaine de marchandises en France (GERARDIN CONSEIL, 2007), les auteurs terminent leur étude en formulant 10 propositions pour les projets futurs. La première est "d'harmoniser les méthodes de suivi économiques et environnementales"; les auteurs insistant d'ailleurs sur le fait que "les principales difficultés rencontrées [pour une estimation juste de l'intérêt des projets] concernent l'évaluation environnementale".

4.2 Planification stratégique et logistique verte

L'émergence de la considération du *développement durable* dans les articles scientifiques traitant de problématiques qui impactent la logistique des entreprises à un niveau stratégique se fait sentir depuis quelques années.

Dans (SBIHI et EGLESE, 2007), les auteurs décrivent par exemple un certain nombre de nouvelles problématiques stratégiques qui surviennent lorsque les objectifs considérés ne sont plus purement économiques, mais impliquent aussi des aspects environnementaux et sociétaux. (SBIHI et EGLESE, 2007) se base pour cela sur des problèmes bien connus tels que la logistique inverse (discipline qui consiste à gérer et à optimiser les flux provenant du consommateur en direction du fabricant ; ces flux pouvant éventuellement servir à recycler et/ou réusiner des marchandises déjà consommées), la gestion des déchets (et donc leur recyclage éventuel) ou encore des problèmes de tournées de véhicules où on s'attache à réduire les émissions de polluants. (SRIVASTAVA, 2007) propose pour sa part un état de l'art complet sur le *Green Supply Chain Management*. (HARRIS et alii, 2009) traite lui d'un *Multi-Objective Uncapacitated Facility Location Problem for Green Logistics*. Dans cet article, Harris et al. définissent deux coefficients W_T et W_F afin de prendre en compte l'aspect environnemental de leur problème. Dans la fonction objectif, W_T et W_F permettent ainsi de pondérer, respectivement, les coûts de transports et les coûts fixes de construction de dépôts. Les auteurs supposent ainsi que le coût environnemental d'une solution est linéairement liée à son coût économique, ce qui peut a priori s'avérer

faux dans des cas concrets. Par exemple, à coût financier fixé, un tronçon de routes parcouru par un camion s'avèrera plus nocif environnementalement si le moteur du camion est thermique plutôt qu'électrique.

4.3 Logistique urbaine et logistique verte

Comme on l'a vu auparavant dans la section 2, la logistique urbaine considère, par définition, les flux de marchandises en ville sous des aspects économiques, mais aussi environnementaux et sociétaux. Comme le mentionne (CRAINIC, 2008), un des enjeux à l'étude de cette nouvelle problématique qu'est la logistique urbaine est en effet de réduire et contrôler le nombre, les dimensions et les caractéristiques des flottes de véhicules en mouvement à l'intérieur des villes, mais aussi d'améliorer l'efficacité des déplacements de ces véhicules et réduire le nombre de kilomètres effectués à vide.

Les concepts de la logistique urbaine coïncident ainsi parfaitement avec les principes du développement durable. Dès lors, il est inutile d'évoquer explicitement la logistique verte lorsqu'on étudie la logistique urbaine.

5 Conclusion

Nous avons, dans cet article, traité une thématique assez récente : la logistique urbaine. Cette problématique vise à définir de nouveaux schémas logistiques, respectueux de l'environnement, dédiés à la ville. Nous avons dans un premier temps défini les enjeux et intérêts de la logistique urbaine. Nous avons ensuite présenté des problèmes stratégiques de la logistique en général, et de la logistique urbaine en particulier. Nous avons finalement conclu sur les problématiques, traitant de logistique, qui considèrent le facteur *développement durable* comme un critère décisionnel important.

Au travers de nos recherches, nous avons pu voir que la logistique urbaine connaît à l'heure actuelle un réel engouement de la part des chercheurs. Ceci s'explique par les efforts concédés par bon nombre d'institutionnels qui ont bien compris qu'il était nécessaire de rapidement trouver des solutions innovantes pour mieux gérer le stockage et le transport de marchandises produites et/ou consommées dans ces milieux denses que sont les grandes villes.

Nous avons aussi pu constater qu'un grand frein au développement de solutions respectueuses de l'environnement dédiées à la logistique repose sur la difficulté à quantifier les impacts environnementaux et sociétaux. En effet, contrairement au coût financier où un consensus est facilement atteint, caractériser des critères environnementaux génériques est difficile. Aucune méthodologie ne fait encore référence en la matière. Chaque article à connotation *développement durable* pose alors ses propres critères, ce qui rend une comparaison entre études difficile.

Remerciements

Ce travail a été réalisé en partenariat avec SOGARIS (aménageur logistique) et le cluster PACA Logistique. Il s'inscrit dans le cadre de la convention de subvention

N° 09 MT CV 39 du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat (PREDIT4).

Bibliographie

- BALAKRISHNAN, A., MAGNANTI, T. L., and MIRCHANDANI, P. (1997). *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization: Network Design*, pages 311–334. Wiley, New York.
- BILLAUT, J.-C. (2006). Recherche Opérationnelle et Génie Industriel. Dans *Journée du Groupement Génie Industriel et de la ROADEF*, Grenoble.
- BOUDOUIN, D. (2006). *Guide méthodologique: Les espaces logistiques urbains*. La Documentation Française, Paris.
- BROWNE, M., SWEET, M., WOODBURN, A., and ALLEN, J. (2005). Urban freight consolidation centres final report. Technical report, University of Westminster for the Department for Transport.
- CBRE (2009). La logistique et les locaux d'activités en France 2009. Rapport technique, CB Richard Ellis.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) (2003). *Delivering the Goods: 21st Century Challenges to Urban Goods Transport*. OECD.
- CRAINIC, T. G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122:272–288.
- CRAINIC, T. G. (2008). City logistics. Technical Report CIRRELT-2008-25, CIRRELT.
- CRAINIC, T. G., GENDREAU, M., and POTVIN, J.-Y. (2009a). Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C*, 17:541–557.
- CRAINIC, T. G., RICCIARDI, N., and STORCHI, G. (2004). Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, 12(2):119–137.
- CRAINIC, T. G., RICCIARDI, N., and STORCHI, G. (2009b). Models for evaluating and planning city logistics systems. Technical Report CIRRELT-2009-11, CIRRELT.
- CRAINIC, T. G., PERBOLI, G., MANCINI, S., and TADEI, R. (2010). Two-Echelon Vehicle Routing Problem : A satellite location analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3):5944–5955.
- DABLANC, L. (2007). Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research*, 41:280–285.
- DASKIN, M. S. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. John Wiley and Sons, New York.

- DELAÎTRE, L. (2008). *Méthodologie pour optimiser le transport de marchandises en ville. Application aux villes moyennes et dans le cadre de l'agglomération de la Rochelle*. Sciences de gestion, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- DREZNER, Z. and HAMACHER, H. W. (2004). *Facility location: applications and theory*. Springer, New York.
- DUFOUR, J.-G., PATIER, D., et ROUTHIER, J.-L. (2007). Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine. *Techniques de l'ingénieur. L'entreprise industrielle*, AGL2(AG8210v2).
- DURAND, B. (2010). E-logistique: le dernier kilomètre au premier plan. *Logistiques Magazine*, 246:42–50.
- FEYS, R. (2010). La logistique urbaine. Rapport technique, Ministère de l'Écologie de l'Énergie du Développement durable et de la Mer (MEEDM).
- GERARDIN CONSEIL (2007). Bilan critique des projets d'expérimentations en matière de distribution urbaine de marchandises initiés par les collectivités territoriales dans les agglomérations urbaines françaises. Rapport technique 02MT75, Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.
- GONZALEZ-FELIU, J. and MORANA, J. (2010). Are City Logistics Solutions Sustainable? The Cityporto case. *Trimestrale del Laboratorio Territorio Mobilità e Ambiente - TeMALab*, 3(2):55–64.
- HAKIMI, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3):450–459.
- HAKIMI, S. L. (1965). Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13(3):462–475.
- HARRIS, I., MUMFORD, C., and NAIM, M. (2009). The multi-objective uncapacitated facility location problem for green logistics. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2009)*, pages 2732–2739.
- INTERFACE TRANSPORT (2004). Espaces Logistiques Urbains de Monaco et La Rochelle. Rapport technique 0303C0070, Agence de l'Environnement de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).
- INTERFACE TRANSPORT, GÉRARDIN CONSEIL, et LET (2009). Logistique et distribution urbaine. Rapport technique, PIPAME.
- KARIV, O. and HAKIMI, S. L. (1979). An algorithmic approach to network location problems. part ii: The p-median. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 37(3):539–560.
- KIALA (2010). Un réseau européen de points de livraison en pleine croissance. <http://www.kiala.fr/fr/history> ; dernier accès : 08/10/2010.

- KLOSE, A. and DREXL, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 162(1):4–29.
- MAGNANTI, T. L. and WONG, R. T. (1984). Network design and transportation planning: Models and algorithms. *Transportation Science*, 18(1):1–55.
- MAIBACH, M., SCHREYER, C., SUTTER, D., VAN ESSEN, H. P., BOON, B. H., SMOKERS, R., SCHROTEN, A., DOLL, C., PAWLOWSKA, B., and BAK, M. (2008). Handbook on estimation of external costs in the transport sector.
- MCKINNON, A. C. (1999). A logistical perspective on the fuel efficiency of road freight transport. In *IEA workshop - Improving fuel efficiency in road freight transport: the role of information technologies*, Paris.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE DE L'ÉNERGIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER (MEEDM) et AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE (ADEME) (2004). Connaître le bilan environnemental des transports de marchandises dans son agglomération. http://www.transports-marchandises-en-ville.org/rubrique.php?id_rubrique=22 ; dernier accès : 08/10/2010.
- MELO, M. T., NICKEL, S., and SALDANHA-DA-GAMA, F. (2009). Facility location and supply chain management - a review. *European Journal of Operational Research*, 196(2):401–412.
- MINOUX, M. (1989). Network synthesis and optimum network design problems: models, solution methods and applications. *Networks*, 19(3):313–360.
- MIRCHANDANI, P. B. and FRANCIS, R. L. (1990). *Discrete Location Theory*. Wiley-Interscience.
- MOIROUX, X. (2009). La logistique urbaine dans l'agglomération marseillaise. Rapport technique, Agence d'urbanisme de l'agglomération marseillaise.
- OMRANI, H., AWASTHI, A., ION, L., and TRIGANO, P. (2009). A hybrid approach for evaluating environmental impacts for urban transportation mode sharing. *Journal of Decision System*, 18(2):185–201.
- PAPAU, Y. (2006). La logistique urbaine : enjeux et étude du cas de lausanne. Mémoire de licence, Université de Lausanne.
- PERBOLI, G., TADEI, R. and VIGO, D. (2008). The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem : Models and Math-Based Heuristics. Technical Report CIRRELT-2008-55, CIRRELT.
- REVELLE, C. S. and EISELT, H. A. (2005). Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165:1–19.
- REVELLE, C. S., EISELT, H. A., and DASKIN, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, 184(3):817–848.

- REVELLE, C. S. and SWAIN, R. W. (1970). Central facilities location. *Geographical Analysis*, 2:30–42.
- SATHAYE, N., HORVATH, A., and MADANAT, S. (2010). Unintended impacts of increased truck loads on pavement supply-chain emissions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(1):1–15.
- SBIHI, A. and EGGLESE, R. W. (2007). Combinatorial optimization and green logistics. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 5:99–116.
- SCHILDE, P. (2007). Il transforme la ville. Bordeaux, tramway of life ! *Champ'éco*, 34:50–54.
- SRIVASTAVA, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1):53–80.
- TANIGUCHI, E., NORITAKE, M., YAMADA, T., and IZUMITANI, T. (1999). Optimal size and location planning of public logistics terminals. *Transportation Research*, 35.
- TANIGUCHI, E. and THOMPSON, R. G. (2002). Modeling city logistics. *Transportation research record*, 1790:45–51.
- TANIGUCHI, E. and THOMPSON, R. G. (2006). *Recent Advances in City Logistics*. Emerald Group Publishing.
- TANIGUCHI, E., THOMPSON, R. G., YAMADA, T., and VAN DUIN, J. (2001). *City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems*. Pergamon.
- TANIGUCHI, E. and VAN DER HEIJDEN, R. E. C. M. (2000). An evaluation methodology for city logistics. *Transport Reviews*, 20(1):65–90.
- THOMADSEN, T. and STIDSEN, T. (2007). The generalized fixed-charge network design problem. *Computers & Operations Research*, 34:997 – 1007.
- VOLLMANN, T. E., BERRY, W. L., and WHYBARK, D. C. (1997). *Manufacturing Planning and Control Systems*. McGraw-Hill, 4 edition.
- WONG, R. T. (1978). A survey of network design problems. Technical report, Massachusetts Institute of Technology.

A Annexes

A.1 Formalisation sous forme de programme linéaire mixte du *fixed cost network design problem*

Dans cette première annexe, nous détaillons une formalisation sous forme de programme linéaire mixte du *fixed cost network design problem* (décrit en Section 3.1). Nous listons tout d’abord les données manipulées en entrée du modèle, ainsi que les variables de décision inhérentes à notre formalisation. Nous

présentons ensuite le programme linéaire complet, avec sa fonction objectif et ses contraintes.

Les données nécessaires à notre modèle sont les suivantes :

- $\mathcal{G} = \{\mathcal{N}, \mathcal{A}\}$: graphe avec \mathcal{N} un ensemble de nœuds et \mathcal{A} un ensemble d'arcs
- \mathcal{P} : ensemble de produits
- f_{ij} : coût de sélection de l'arc (i,j) , $\forall (i,j) \in \mathcal{A}$
- c_{ij}^p : coût de transport d'une unité de p sur l'arc (i,j) , $\forall (i,j) \in \mathcal{A} \forall p \in \mathcal{P}$
- q^p : demande de produit p , $\forall p \in \mathcal{P}$
- d_i^p : demande de produit p au nœud i , $\forall i \in \mathcal{N} \forall p \in \mathcal{P}$. On a :
$$d_i^p = \begin{cases} q^p & \text{si le produit } p \text{ a pour origine le nœud } i \\ -q^p & \text{si le produit } p \text{ a pour destination le nœud } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
- M un nombre arbitrairement grand

Les deux groupes de variables de décision suivants sont manipulés dans le modèle décrit ici :

- x_{ij}^p représente la quantité de p en transit sur l'arc (i,j) , $\forall (i,j) \in \mathcal{A} \forall p \in \mathcal{P}$
- $y_{ij} = 1$ si l'arc (i,j) est sélectionné, 0 sinon, $\forall (i,j) \in \mathcal{A}$

Fort des données et des variables de décision détaillées ci-dessus, le *fixed cost network design problem* peut se formaliser par le programme linéaire $[FCNDP]$:

$$[FCNDP] \min \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \sum_{p \in \mathcal{P}} c_{ij}^p \cdot x_{ij}^p \quad (1)$$

$$\forall i \in \mathcal{N} \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ij}^p - \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ji}^p = d_i^p \quad (2)$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ij}^p \leq M \cdot y_{ij} \quad (3)$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad x_{ij}^p \geq 0 \quad (4)$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad y_{ij} \in \{0,1\} \quad (5)$$

La fonction objectif (1) de $[FCNDP]$ mesure le coût total du système. Ce dernier est déterminé par la somme des coûts *fixes* de sélection des arcs et des coûts *variables* de transport. (2) exprime les traditionnelles contraintes de la *loi de conservation de flot* et assure que la demande de chaque client est satisfaite. On s'assure de plus que les unités de produit ne transitent que sur des arcs sélectionnés (3). (4) et (5) définissent enfin les domaines de définition des variables de décision.

A.2 Formalisation sous forme de programme linéaire en nombres entiers du *p-median problem*

Dans cette seconde annexe, nous décrivons la formalisation sous forme de programme linéaire en nombres entiers du *p-median problem* (décrit en Section 3.2)

proposée dans (REVELLE et SWAIN, 1970). Dans un premier temps, nous détaillons les données et les variables de décision du modèle. Le programme linéaire complet est ensuite exposé.

Les données nécessaires au modèle sont les suivantes :

- \mathcal{I} : ensemble de clients
- \mathcal{J} : ensemble de localisations admissibles pour des dépôts
- p : nombre de localisations à sélectionner
- q_i : demande du client i , $\forall i \in \mathcal{I}$
- d_{ij} : distance entre le client i et la localisation j , $\forall i \in \mathcal{I} \forall j \in \mathcal{J}$

Les deux groupes de variables de décision suivants interagissent dans le modèle :

- $x_{ij} = 1$ si le client i est affecté à la localisation j , 0 sinon, $\forall i \in \mathcal{I} \forall j \in \mathcal{J}$
- $y_j = 1$ si la localisation j est sélectionnée, 0 sinon, $\forall j \in \mathcal{J}$

Fort des données et des variables de décision présentées auparavant, (REVELLE et SWAIN, 1970) propose la formalisation $[PMP]$ suivante. $[PMP]$ est un programme linéaire en nombres entiers modélisant le p -median problem.

$$[PMP] \min \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} q_i \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (6)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \quad \sum_{j \in \mathcal{J}} x_{ij} = 1 \quad (7)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad x_{ij} \leq y_j \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} y_j = p \quad (9)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$\forall j \in \mathcal{J} \quad y_j \in \{0,1\} \quad (11)$$

$[PMP]$ vise à réduire les coûts, pondérés par les demandes, d'affectation des clients aux localisations sélectionnées (6). Chaque client est rattaché à une unique localisation (7) et la localisation concernée doit être sélectionnée (8). (9) assure pour sa part qu'exactement p localisations sont sélectionnées. (10) et (11) définissent enfin les domaines de définition des variables de décision.

La formalisation du *Uncapacitated Facility Location Problem* (et par extension du *Capacitated Facility Location Problem*) découle de $[PMP]$. La modélisation du *UFLP* est obtenue en ôtant de $[PMP]$ les contraintes (9) et en ajoutant le terme $\sum_{j \in \mathcal{J}} f_j \cdot y_j$ à la fonction objectif (6), f_j étant le coût de sélection de la localisation $j \in \mathcal{J}$.

